

OBJEVOVÁNÍ EXOPLANET
aneb
KOMEDIE PLNÁ OMYLŮ
2009

Jiří GRYGAR

Fyzikální ústav Akademie věd ČR, Praha

PRAVĚK

1698 – C. Huygens: návrh na hledání exoplanet

1916 – 1963 P. van de Kamp: astrometrie Barnardovy hvězdy

0,6m refraktor (Sproul Obs.; 48 let práce): vlnovka
vlastního pohybu s periodou 24 let – důkaz exoplanety?

**1969 – 1998 McCormick Obs.: nepotvrzeno; šlo o sezónní
změny geometrických vlastností refraktoru ☹**

**1975 – J. Tarterová: hnědí trpaslíci – přechod mezi hvězdami a
planetami: hmotnosti $0,08 \div 0,01 M_{\odot}$**

**1989 – G. Marcy aj.: 100 hvězd v okolí Slunce – žádný hnědý
trpaslík!**

**1982 – 1993 G. Walker aj.: 21 trpasličích hvězd (CFHT) – žádná
exoplaneta (přesnost 15 m/s)**

PRŮLOM

1992 – A. Wolszczan + D. Frail: milisekundový pulsar 1257+12
(Vir; per 6 ms; stálost $3 \cdot 10^{-20}$!) – objev 2 exoplanet
(3,4 + 2,8 M_z ; 0,36 + 0,47 AU; per 67 + 98 d)

X 1995 – M. Mayor + D. Queloz: exoplaneta u 51 Pegasi (OHP)
Hvězda 5,5 mag; sp G3 V; 15 pc; 1,1 M_\odot ; ampl. RV 59 m/s.
Exoplaneta 0,05 AU !; per 4,2 d !; 1,3 R_J ; 0,5÷1,2 M_J ; 1 300 K!

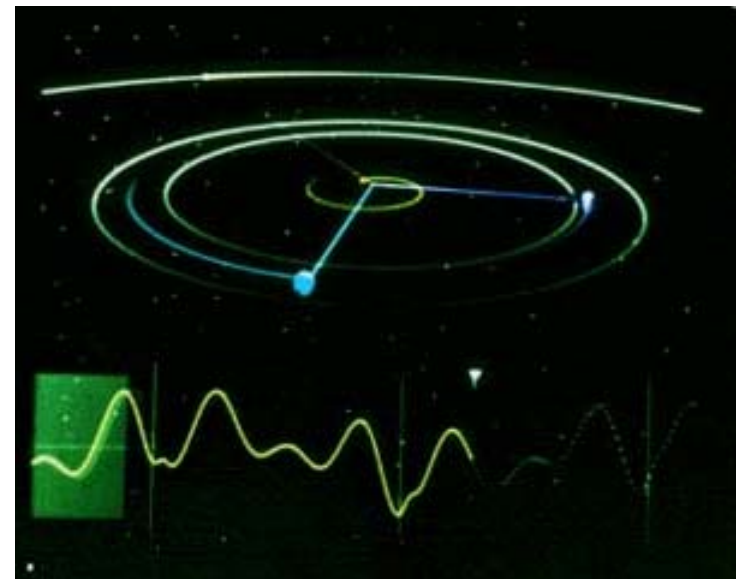
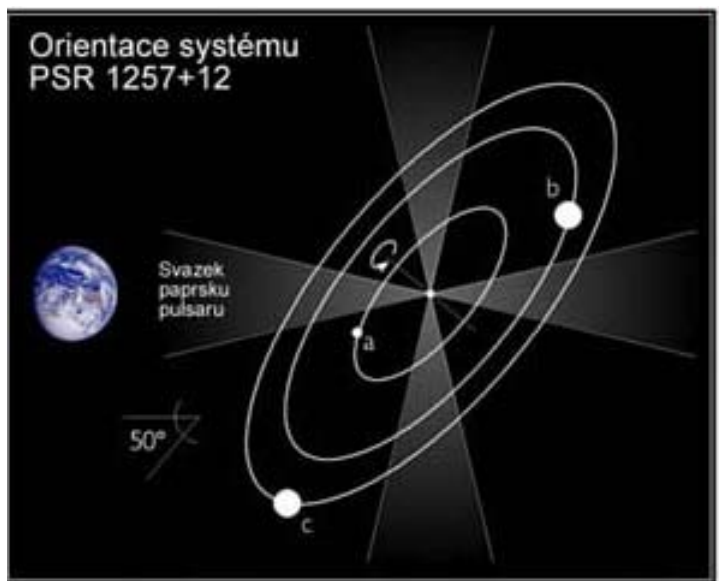
X 1995 – H. Nakajima aj.: hnědý trpaslík Gliese 229B (Palomar)
(Lep) 6 pc; společný vl. pohyb s hvězdou Gl 229A (dM1); 32 AU;
 $e > 0,25$; per 236 r; 0,04÷0,055 M_\odot (47 M_J); 1,0 R_J ; 950 K; $6 \cdot 10^{-6} L_\odot$

PROČ TO NEŠLO DŘÍV?

- Poměr jasností (*exoplaneta; hnědý trpaslík*) / *hvězda* je v optickém oboru příliš velký (miliardtina; výhodnější je infračervené pásmo spektra (stotisícina) – nebyla IČ čidla
- Předstuda, že exoplanety budou mít oběžné doby řádu stovek až tisíců dnů, tj. vzdálenosti $0,5 \div 5$ AU ==> chybná strategie vyhledávání
 - Nikdo nečekal, že exoplanety mohou existovat u zhroucených neutronových hvězd, které vznikly po katastrofálním výbuchu supernov

METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – I

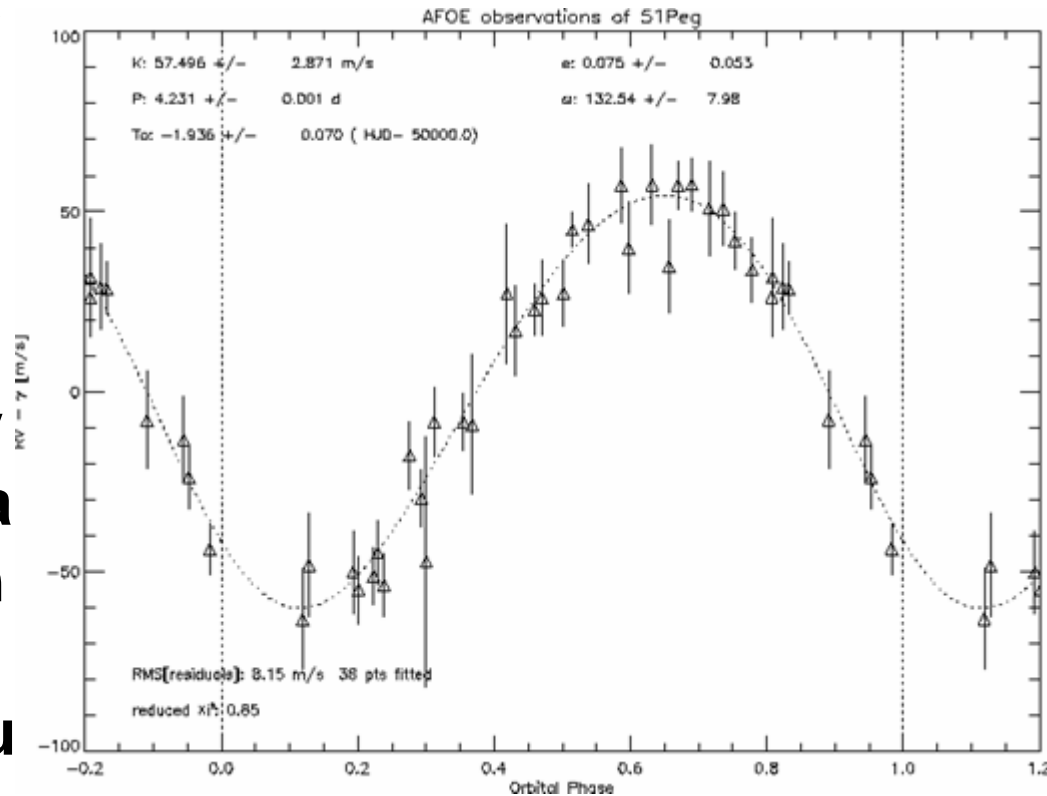
- Kolísání impulsních period stabilních pulsarů: vlivem gravitačního vychylování neutronové hvězdy oběhem exoplanety dochází k měřitelnému kolísání periody: velmi citlivá metoda nezávisající prakticky na vzdálenosti pulsaru od Země (citlivost až 1% hmotnosti Země – tj. „Měsíc“) (dosud jen půl tuctu případů)



METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – II

**Kolísání radiální rychlosti
mateřské hvězdy hlavní
posloupnosti vlivem
gravitačního vychylování
hvězdy exoplanetou –
vhodné pro spektrální třídy
F – M; prakticky nezávisí na
vzdálenosti, ale vhodné jen
pro hvězdy jasnější než 12
mag. Přesnost spektrografu
 ± 5 m/s**

(velmi produktivní metoda –
dosud přes 300 exoplanet)

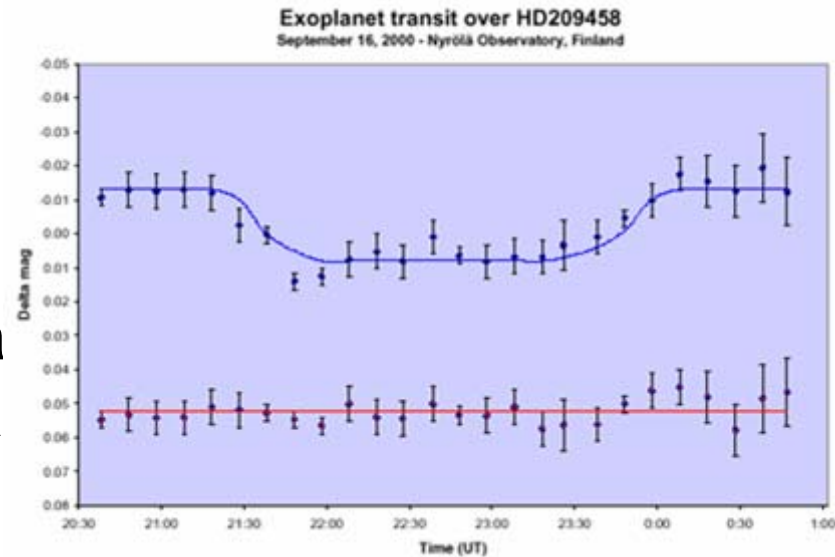


METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – III

**Fotometrie transitů (přechodů)
tmavých exoplanet před zářícím
kotoučkem mateřské hvězdy –
poklesy činí až 0,03 mag**

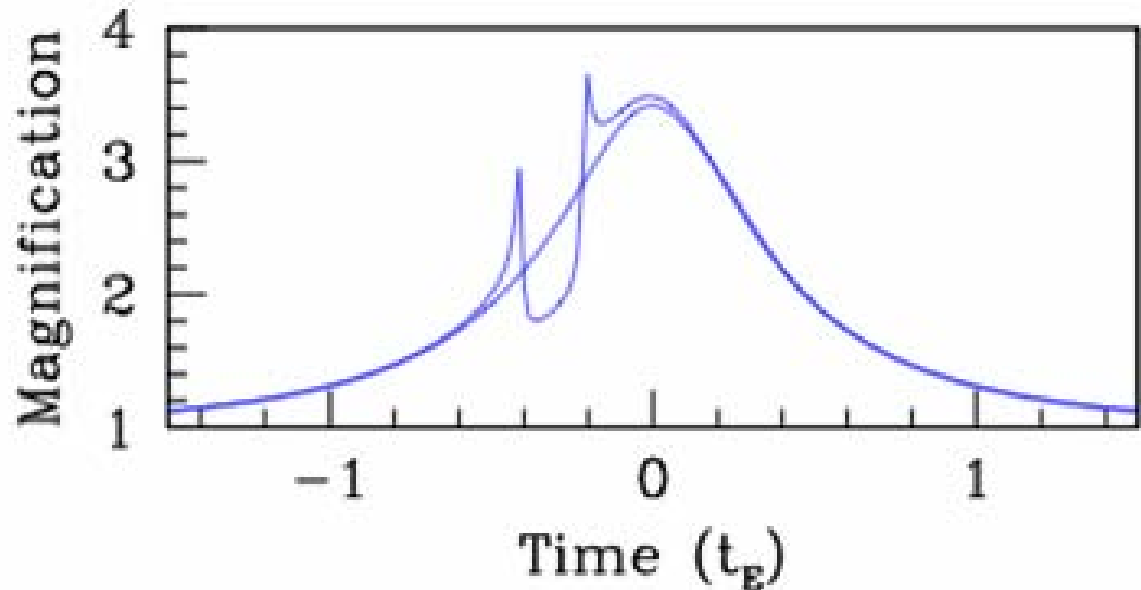
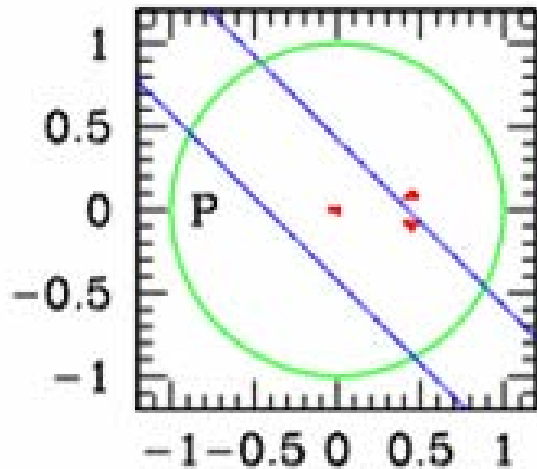
**v optickém oboru spektra (Obdoba
fotometrie těsných dvojhvězd – dává
velmi dobré parametry soustavy:**

hmotnosti, rozměry, orbitální
elementy. Dosud od r. 1999 objeveno
přes 50 transitujících exoplanet;
metoda je velmi perspektivní díky
družicím Kepler, CoRoT a Gaia jakož
i přehlídkám jako PanSTARRS a
LSST)



METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – IV

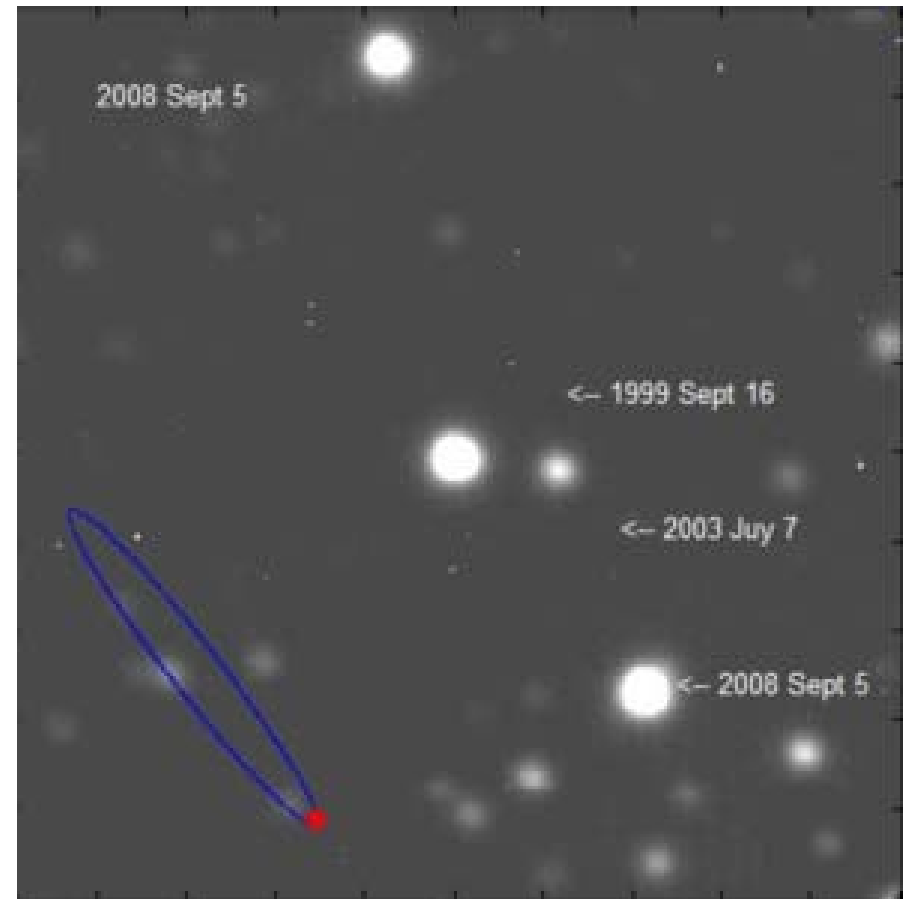
- Průběh změn jasnosti gravitačních mikročoček. Má-li gravitační mikročočka (hvězda) průvodce, může se na světelné křivce objevit „zoubek“ při zesílení světla vzdálené hvězdy dostatečně hmotnou exoplanetou (od r. 2004: OGLE-2003-BLG-235Lb) (Metoda vhodná i pro exoplanety v sousedních galaxiích; dosud objeveno ~ 10 případů)



METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – V

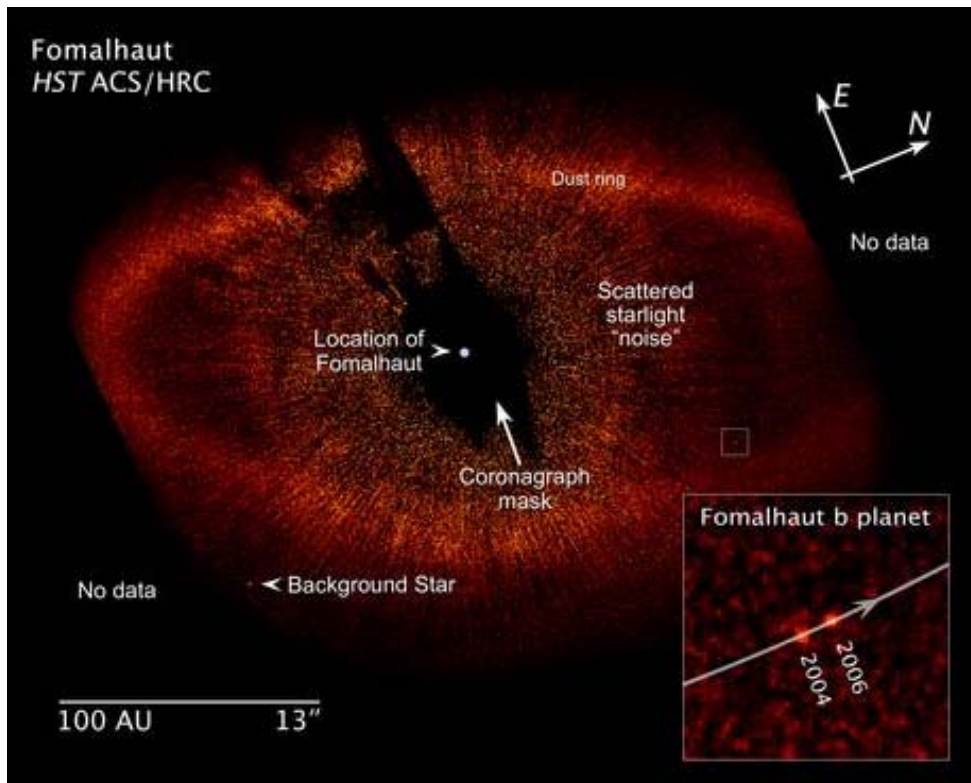
- **Přímá astrometrie (à la van de Kamp):** dostatečně hmotná exoplaneta způsobí vlnovku vlastního pohybu mateřské hvězdy. Z amplitudy a periody vlnovky lze určit periodu, hmotnost i délku velké poloosy oběžné dráhy exoplanety:

VI 2009 – (Palomar) VB 10b:
(Aql; 6 pc; dM; $0,08 M_{\odot}$. P 272 d;
 $6 M_J$; 0,4 AU). Gaia to podstatně
rozšíří: dosah 17 mag a 200 pc



METODY NALÉZÁNÍ EXOPLANET – VI

- **Přímé zobrazení exoplanety: Dosud vyhrazeno jen obřím teleskopům, event. kosmickým (HST, VLT, Keck...)**
(Dosud kolem 10 případů. Metoda je však perspektivní; zejména po vypuštění družice Gaia dojde k četným objevům)



2008:
Fomalhaut
(PsA; 8 pc;
exoplaneta 3 M_J;
vzdálenost 119 AU;
per 870 r.

Snímky HST
z let 2004 a 2006

VÝZNAMNÉ VÝSLEDKY – I

Planetární soustava u pulsaru 1257+12 (300 pc)

A.	0,19 AU	25 d	$e = 0,00$	0,02	M_z	„měsíc“
B.	0,36 AU	67 d	0,02	4,3	M_z	rezonance 2:3
C.	0,47 AU	98 d	0,03	3,9	M_z	rezonance 3:2
D.	2,7 AU	3 r	?	0,0004	M_z	jádro komety?

HD 209458 (47 pc)

XI 1999 (Peg, $V = 7,6$ mag; sp G0 V; stáří 4,5 mld. r.): metoda RV:
per 3,5 d; 0,05 AU; první pozorování přechodu exoplanety:
„vanička“ pokles 0,02 mag; sklon 87° ; hvězda $1,1 M_\odot$ $1,1 R_\odot$;
exoplaneta $0,7 M_J$; $1,4 R_J$; hustota jen $1/3$ hustoty vody !
Změny profilů sp. čar během oběhu

VÝZNAMNÉ VÝSLEDKY – II

Planetární soustava u dvojhvězdy u And (14 pc)

Hvězda sp F8 V; $1,3 M_{\odot}$; $2,0 R_{\odot}$; průvodce sp. M 4,5 v 750 AU;

1996-1999: 3 exoplanety per 4,6 dnů ÷ 3,6 roků ; $0,06 \div 2,5$ AU;
 $e = 0,03 \div 0,25$; $0,7 \div 4 M_J$; životnost > 100 mil. r.; stáří 2,6 mld. r.

Planetární soustava u hvězdy 55 Cnc (13 pc)

1996 - 2007

($V = 6,0$ mag; sp G8 V;; $0,96 R_{\odot}$; průvodce M3 V vzdálen 1 kAU;

primár $0,95 M_{\odot}$ stáří 4,5 mld. r.):

metoda RV - 5 exoplanet: per 2,8 d – 14,3 r; $0,04 \div 5,8$ AU;

$e = 0,01 \div 0,2$; $0,03 \div 3,8 M_J$;

VÝZNAMNÉ VÝSLEDKY – III

Hlavní typy exoplanet:

- a) Horké jupitery (51 Peg, 55 Cnc, tau Boo, ypsilon And)
- b) Planety s výstřednou drahou (HD 114 762, 70 Vir, 16 Cyg B)
- c) Standardní jupitery (47 UMa, Lal 21185 B + C)
- d) Planety kolem pulsarů (B1257+12 B,C,D; B1620-26)

Exoplanety s výstřednou drahou mají vesměs hmotnosti $>5 M_J$.

1997 - nejstarší známá exoplaneta: binární pulsar B1620-26:
(Sco; kulová hvězdokupa M4; 1,8 kpc; neutronová hvězda + bílý trpaslík; stáří 13 mld. r.): obří exoplaneta $\sim 10 M_J$

Exoplanety nejnižších hmotností ($M_Z = 0,003 M_J$):

2005 - Gliese 876d: $0,018 M_J$ ($5,8 M_Z$);

2008 – HD 40307 b: $0,013 M_J$ ($4,2 M_Z$);

2009 - CoRoT-7b: $0,035 M_J$ ($11 M_Z$);

VÝZNAMNÉ VÝSLEDKY – IV

Atmosféry hnědých trpaslíků:

Pro hnědé trpaslíky $> 0,013 M_{\odot}$ vyhoří při omezené TNR deuterium během < 100 mil. let. Pro $> 0,06 M_{\odot}$ vyhoří také lithium. Při teplotě atmosféry $< 2,5$ kK vzniknou zrnka Si.

Atmosféry exoplanet:

Při teplotě < 400 K se vytvoří vodní oblaka; < 200 K oblaka čpavku
2001 - HD 209458 („Osiris“): atmosféra H I a Na I – vodík uniká!

Modelové výpočty I. Hubeného (program **TLUSTY**):

2008 - metoda transitů: souhrn spekter (hvězda + exoplaneta)

Během zákrytu exoplanety získáme čisté spektrum hvězdy

Jeho odečtením od souhrnu se získá čisté spektrum exoplanety!

Podobně lze získat údaje o fázi exoplanety od novu po úplněk

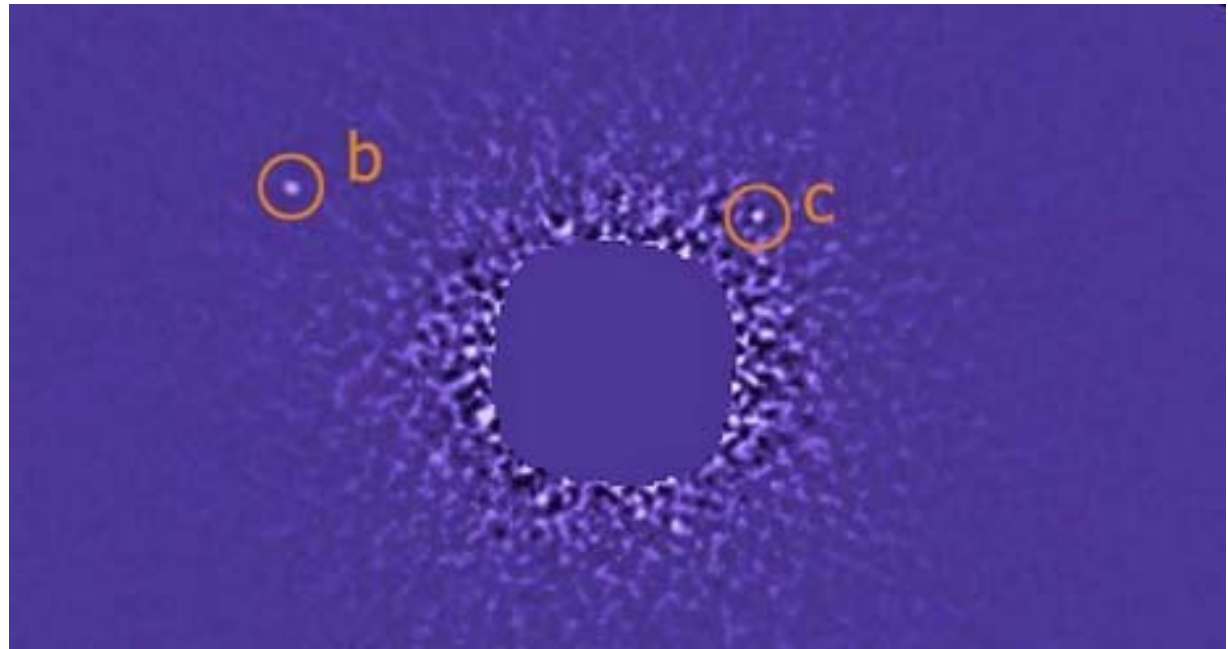
Zvláště úspěšné infračervené pozorování družicí SST

PŘÍMÁ POZOROVÁNÍ EXOPLANET

Po celé řadě falešných poplachů se zdařilo zobrazit exoplanety v r. 2008, tj. Fomalhaut b (velmi vzdálená exoplaneta) a HR 8799 b,c,d (tři exoplanety dosti blízké k mateřské hvězdě):

HR 8799

**(40 pc; 1,5 M_{\odot} ; 3 EP: b+c+d: 25+40+70 AU; 10+10+7 M_J ;
(Gemini+Keck)**



KOMEDIE PLNÁ OMYLŮ

- **1855-1890: Exoplaneta u dvojhvězdy 70 Ophiuchi – omyl**
- **1950-1963: Barnardova hvězda – P. van de Kamp – deformace dalekohledu**
- **1991: Pulsar 1829-10 (Sct; 9 kpc) má exoplanetu s per 180 d.**
(A. Lyne aj. – odvoláno 1992 – chyba v redukci dat)
- **Hledání ztroskotávalo na předsudku, že cizí sluneční soustavy se v zásadě budou podobat té naší**
(G. Walker, G. Marcy a P. Butler)

KOMEDIE PLNÁ OMYLŮ STÁLE ŽIVÁ

- **1993 - výpočet S. Thorsetta a R. Deweye:** výbuch supernovy zničí všechny planety – měření Wolszczana a Fraila se dají vysvětlit precesí rotační osy neutronové hvězdy (nápad ad hoc).
- **1997 – D. Gray:** periodické variace radiální rychlosti 51 Peg jsou způsobeny neradiálními pulsacemi hvězdy. Autor námitku odvolal po publikaci velmi kvalitních spekter 51 Peg v r. 1998.
- **1998 - S. Terebeyová aj. :** snímek HST NICMOS: z dvojhvězdy TMR-1A,B (separace 42 AU) v obřím molekulovém mračnu (Tau; 140 pc) vychází svítící obloukové vlákno, na jehož konci ve vzdálenosti 1,4 kAU je exoplaneta vymrštěná z dvojhvězdy mechanismem, který předtím navrhl A. Boss. Odvoláno r. 2000: jde o červeného trpaslíka, který se na vlákno pouze promítá.

PŘEKVAPENÍ

- U neutronových hvězd existují kamenné exoplanety (po výbuchu supernov)
- Exoplanety často obíhají daleko blíže k mateřské hvězdě než Merkur vůči Slunci a nevypaří se navzdory vysoké teplotě
- Dráhy exoplanet jsou často velmi protáhlé elipsy ($0,2 < e < 0,9$) – proměnný ohřev atmosféry
- Exoplanety migrují od vzniku ve větších vzdálenostech od mateřské hvězdy směrem k hvězdě, popř. od hvězdy
- Exoplanety mohou existovat na stabilních drahách i u těsných dvojhvězd
- Výskyt exoplanet roste s metalicitou hvězdy (stářím vesmíru)

ZÁVĚR

Před 14 lety obor „Exoplanety“ fakticky neexistoval. Nebyla téměř žádná pozorovací data.

Dnes je známo kolem 350 objektů tohoto typu, lze určit jejich dráhové elementy, geometrické i fyzikální parametry a chemické složení i dynamiku jejich atmosfér.

Každá z metod hledání exoplanet je výběrová, tj. dává přednost určité kombinaci vlastností a geometrie planetárních systémů. Proto jsou současné výsledky zkreslené tzv. výběrovými efekty a lze čekat ještě mnohá překvapení.

Během příští dekády lze očekávat nalezení tisíců až statisíců exoplanet!

**FANTAZIE PŘÍRODY JE NEPOROVNATELNĚ VĚTŠÍ NEŽ
PŘEDSTAVIVOST NEJPROZÍRAVĚJŠÍCH ASTRONOMŮ**